

无人机技术在山地光伏电站施工中的应用

付秋云¹, 孔禹¹, 林杰², 胡益民¹, 张涛¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司绿能分公司, 湖南 株洲 412001;

2. 会泽华电道成清洁能源开发有限公司, 云南 曲靖 654200)

摘要 山地光伏电站建设面临地形复杂、地块分散、坡度大、交通不便等挑战, 传统施工方式成本高、效率低且对环境影响较大。本文以云南省会泽县山地光伏项目为例, 探讨无人机技术在光伏材料转运中的应用, 通过对比分析, 无人机技术在成本控制、施工效率、安全管理和生态环境保护等方面展现出显著优势。研究结果表明, 无人机转运材料不仅降低了施工成本, 减少了人工搬运的安全风险, 还加快了施工进度, 同时最大限度地减少了对地表植被的扰动, 符合绿色施工要求。本文的研究旨在为山地光伏电站建设提供新的技术思路。

关键词 山地光伏电站; 无人机技术; 成本控制; 安全质量; 环境保护

中图分类号: TU27; V19

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.15.009

0 引言

随着全球对可再生能源需求的不断增长, 光伏发电作为一种清洁能源形式, 得到了广泛应用。然而, 山地光伏电站的建设面临着地形复杂、地块分散、坡度大、交通不便等诸多挑战, 传统的施工方式难以满足要求。无人机技术的引入为解决这些问题提供了新的思路。本文以云南省会泽县山地光伏项目为例, 探讨无人机技术在山地光伏电站建设中的应用, 分析其在成本控制、施工效率、安全管理和环境保护等方面的优势, 旨在为类似项目的施工管理提供参考, 推动山地光伏电站的可持续发展。

1 工程背景

矿山镇老坪子村唐家丫口光伏项目位于云南省会泽县上村乡。项目直流侧装机容量为 108 MWp。项目采用分块发电、集中并网方案, 光伏区采用双面双玻单晶硅 n 型组件, 项目分 57 个地块共 36 个光伏发电单元, 400 台 225 kW 组串式逆变器, 每台逆变器接入 16、17 个组串。光伏支架采用钢结构固定支架形式, 安装倾角 25°, 组件最低点距地面不小于 2.5 m。光伏阵列支架基础采用 C30 混凝土灌注桩桩基, 每个光伏组串采用 8 根双桩支架。双桩桩径为 150 mm, 设计桩长为 1.4 m。箱式变压器基础为灌注桩桩基加钢筋混凝土平台结构。集电线路采用直埋电缆和架空线路相结合的方式。

2 施工运输和转运难点及要点

2.1 材料进场

本项目光伏区地块位于偏远山区, 地块周边林地较多。进场道路多为乡村道路, 已有的道路狭窄且转

弯半径较小, 不利于光伏电站材料的运输。

为确保材料运输到位, 可对结构件尺寸设计和施工方案进行优化, 减少运输要求。但因地块分散在山区, 较多地块周边无原有道路, 施工时仍需修建运输道路。本项目所属乡镇植被覆盖率高, 乡村道路需穿越林地、农用地、村民自建道路或盘山道路, 道路改扩建将面临高成本、高难度、难协调且面临破坏地类图斑被政府职能部门执法的风险^[1]。

2.2 安全、环保措施

项目地块特点为: 地块面积小; 地形坡度大, 大部分山体坡度超过 35°, 局部坡度达 70°; 地质以中风化岩石居多, 行走易滑; 地貌冲沟较深, 深坑较多, 局部存在陡坡, 行走难度大^[2]。大量采用人工山地来回搬运材料易造成安全风险, 不利于项目安全管控。

随着国家政策对农用地和林草地保护要求的逐步提高, 绿色施工管理要求也日趋严格。在项目施工过程中, 职能部门也需严格管控植被保护实施情况。项目实施时, 需降低项目施工的机械化程度, 减少地表扰动。

2.3 施工散料

桩基、支架组件、电气等材料转运至光伏电站光伏区地块周边时, 需将材料散布至地块内。光伏区内机械化散料程度决定了散料难易程度。本项目光伏区地块地形、地貌、地质条件较差, 较多地块场内无交通道路, 材料不能直接采用运输车辆转运材料至地块内^[3]。

常规山地光伏项目采用山地爬山虎、畜力或纯人工等方式进行材料转运, 但受地块大小、地质条件和堆场限制, 本项目适用性较低。采用纯人工代替大型

机械散料，易造成人工成本偏高和临时农民工用工等问题，不利于项目管理^[4]。

2.4 桩基混凝土浇筑

山地光伏电站光伏区支架桩基础混凝土浇筑可采用溜槽由高至低传送混凝土。本项目较多地块顶部和地块内部无道路，采用纯人工挑运混凝土浇筑的方式，转运成本较高，施工进度慢。

2.5 总结

本项目常规的运输、转运和散料等施工方式实施难度大。针对各地块情况，对于地块小、交通条件不便的、地理条件较差地块，材料到达光伏区地块附近后应用无人机技术对材料进行转运，并匹配相应的实施方案，可在成本造价、安全质量、施工进度、生态环境保护等方面对项目的实施进行一定的优化。

3 无人机技术的应用对比

3.1 无人机技术参数及说明

3.1.1 无人机常规技术参数

(1) 整机重量小于 70 kg (含电池)；(2) 最大起飞重量不高于 120 kg；(3) 最大飞行半径不小于 2 km；(4) 最大可承受风速不超过 6 m/s；(5) 载重量不大于 50 kg。

3.1.2 无人机其他要求及说明

(1) 无人机通常采用租赁形式，一台一天起飞次数 100~200 次；(2) 无人机计费形式：吊运一次单价 8~14 元/次。

3.2 成本造价对比

1. 道路施工成本统计。本项目直流侧容量 108 MWp，合同道路总长约 10 km。道路施工单价 15~20 万元/km，平均每个地块容量约为 1.9 MWp，每个地块折合的道路平均施工长度约为 0.18 km，对应的道路施工费用为 2.7~3.6 万元，折合道路施工平均单价约 0.03 元/Wp。

2. 其他形式材料转运成本统计。山地光伏区陡坡地块无进场道路时常规做法为：爬山虎等小型机械转运、人工及畜力转运等方式。山地爬山虎和畜力转运材料方式受地块大小、地块地质和地块内是否有堆场等条件限制，本项目通用性不高。可实施性较高的方式为纯人工散料。

人工散料：1 组串散料为 71 人次，折合人工为 1.775 人工，外加电缆和逆变器等材料，1 MW 地块 (62 组) 施工人工散料折合费用为 38 824 元，折合单价为：0.039 元/W。具体计算流程详见表 1。

3. 无人机材料转运费用统计。采用无人机完成组串所有材料散料为 67 次，合计价格 670 元，外加电缆和逆变器等材料折合 1 MW 地块 (62 组) 施工散料费用

约为 47 334 元，折合单价为 0.047 元/W。具体计算流程详见表 2。

表 1 每组串材料人工散料统计

每组串材料人工散料统计 (双桩)					
物项	数量	单位	人工搬运次数 (次)	每人每天平均搬运趟数 (趟)	折合人工 (人工/天)
组件	28	块	28		
立柱	8	条	4		
斜梁	4	条	2		
檩条	12	条	12		
斜撑	8	条	3		
拉条 / 支撑	39	条	6	40	1.775
螺栓、连接件、抱箍	1	项	2		
混凝土	16	桶	8		
钢筋及下立柱	8	根	4		
接地扁铁、套管	4	项	2		
合计			71		1.775

(注：①现场混凝土用量含 1.5 的系数。② 1 MW 逆变器人工运费：4 人一天 300 元，合计 1 200 元；1 MW 交流电缆约 4 根，由 15 人单日完成，人工单价 300 元/天，总费用为 4 500 元；1 MW 逆变器支架：4 套，人工搬运 2 次。③散料搬运人工单价：300 元/天。)

4. 费用对比分析。对比①+②=0.069 元/Wp 的折合单价，无人机施工③=0.047 元/Wp 的折合单价性价比更优。

3.3 安全质量管理对比

1. 安全风险。本项目地形坡度大；地质中风化岩石居多行走易滑；地貌冲沟较深，深坑较多，局部存在陡坡，行走难度大；大量采用人工山地来回搬运材料存在安全隐患且不利于安全管控。采用无人机可减少搬运材料人数及工人的搬运移动范围，有利于项目安全管理。

2. 质量管控。(1) 采用无人机：吊运组件、拉条等材料，可减少组件隐裂和材料受损概率；提高吊运混凝土效率，减少因运输时间过长导致混凝土初凝，有利于现场质量管控^[5]。(2) 以本项目为例 (575/620 组件)：机械配合人工转运组件破损率约为 2%，若项目整个破损组件数预计可达 364 块，损失费约 17.7 万元。无人机转运组件几乎无破损。

表 2 每组串无人机工程统计

每组串无人机工程统计（双桩）					
物项	数量	单位	无人机吊 飞一次		无人机运 输价格 (元)
			运次数 (次)	单价(元) / 次)	
组件	28	块	28	10	280
立柱	8	条	4	10	40
斜梁	4	条	1	10	10
檩条	12	条	6	10	60
斜撑	8	条	4	10	40
拉条 / 支撑	39	条	6	10	60
螺栓、连 接件、抱 箍	1	项	2	10	20
混凝土（桩）	8	根	10	10	100
钢筋及下立柱	8	根	2	10	20
接地扁铁、 套管	4	项	4	10	40
合计			67		670

（注：①现场混凝土用量含 1.5 的系数。② 1 MW 逆变器人工运费：4 人一天 300 元，合计 1 200 元；1 MW 交流电缆：4 段电缆 15 人一天完成。每人每天 300 元，合计 4 500 元；1 MW 逆变器支架：4 套，无人机 2 次。）

3.4 施工进度对比

1. 纯人工散料：采用人工挑运混凝土，平均 12 人 1 天桩基浇筑功效为 100 根桩，1 MWp（496 根）桩基混凝土浇筑需要约 60 个人工；支架、组件散料需要约 110 个人工。综上，采用纯人工散 1 MWp 材料，合计约 170 个人工。

2. 无人机散料：采用 1 台无人机散料，4 名工人配合浇筑混凝土，一天约浇筑 90 根桩，则 1 MWp（496 根）桩基混凝土浇筑需要 22 个人工；1 台无人机支架、组件散料，4 名工人配合装料和卸料，1 MWp 材料散料需 83 个人工。综上，采用无人机散 1 MWp 材料，合计需要约 105 个人工。

因此，采用无人机散料，折合人工数量越少，施工进度越快。

3.5 生态环境保护对比

1. 减少地表扰动。采用无人机技术吊运材料，减少机械设备运输对地表扰动，保持原生地貌，有利于环境保护。

2. 减少产生违法图斑处理的代价。（1）违法图斑：

施工过程中临时产生的清表、临时堆场、临时道路等对地表的扰动都为违法图斑。（2）以林草局对林草图斑处理为例。地表扰动面积行政处罚界限为：其它草地 < 20 亩，公益林 < 5 亩，其他林地 < 10 亩。若超出以上面积，将面临刑事处罚。

3. 减少植被恢复成本。植被保护和恢复：因国家对项目用地政策的紧缩，大部山地分光伏项目能采用的图斑类别为林草图斑中的其他草地。项目总图在报批政府林草单位时，需同时上报：项目植被保护方案、林地恢复方案、草地恢复方案等方案，政府职能会针对项目的实施方案（地表扰动情况），核实项目植被恢复费用。

以本项目政府林草单位植被保护要求为例：

责任范围：该项目必须采取场地平整、地表覆土、植被恢复、景观绿化、边坡绿化工程措施。其中：光伏场区办理临时用地（草原）面积 0.2 581 hm²，需要进行场地平整，并覆土后恢复植被；对光伏阵列区 108.6 052 hm² 面积，因施工造成了局部破坏，对受到破坏的面积，需要进行覆土平整后，恢复植被；未布设光伏板区域 25.5 833 hm² 面积，在施工过程中会造成一定破坏，设计为景观恢复区，采取破土免耕撒播灌草，进行景观植被恢复。

4 结束语

随着国家新能源项目的逐步推进，山地光伏项目越来越多，后续光伏项目的场址条件也将越来越差。另外，国家对农用地和林草地保护要求也在逐步提高，绿色施工要求将越来越严，以牺牲环境为代价的生产方式将会逐步被淘汰。在新环境下对项目实施方案做相应的调整才能适应工程的发展。山地光伏电站面对越来越严峻的施工环境，无人机技术在山地光伏项目上的应用能在一定程度上从成本造价、安全质量、施工进度，特别是生态环境保护等方面促进山地光伏项目的可持续发展。

参考文献：

- [1] 卢强. 浅谈山地光伏区施工难点及应对措施 [J]. 人民黄河, 2023, 45(S1): 175.
- [2] 石营. 山地高陡坡微型光伏基础施工重难点分析与对策 [J]. 水电站机电技术, 2023, 46(07): 129-130.
- [3] 赵建生. 山地光伏发电建设项目施工管理对策研究 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(01): 195.
- [4] 任龙. 山地光伏电站项目施工管理对策研究 [J]. 中小企业管理与科技, 2022(08): 47-49.
- [5] 曾庆贺. 浅谈山地光伏灌注桩基础施工质量控制 [J]. 湖南水利水电, 2022(02): 5-6.